

EMTP를 이용한 매설지선의 규약접지임피던스 해석

(Analysis for the conventional impedance of counterpoise using EMTP)

김종호* · 조정현 · 백영환 · 이강수 · 이복희

(Jong-Ho Kim · Jeong-Hyeon Joe · Young-Hwan Beak · Gang-Su Lee · Bok-Hee Lee)

인하대학교 IT공대 전기공학과

Abstract

When the lightning currents flow through the ground electrode, the grounding system should be evaluated by the grounding impedance rather than the ground resistance because a grounding system shows the transient impedance characteristic by the inductance of the ground electrode and the capacitance of the soil. The ratio of the peak values of electric potential and currents is the conventional impedance that shows the transient characteristic about impulse currents of the grounding system in a roundabout way. The grounding system having low conventional impedance is a fine grounding system with low electric potential when the lightning currents flow. In this paper the conventional impedance of the counterpoise is calculated by using the distributed parameter circuit model and embodied the distributed parameter circuit model by using the EMTP program. The adequacy of the distributed parameter model is examined by comparing the simulated and the measured results. The conventional impedance of the counterpoise is analyzed for first short stroke and subsequent short stroke currents.

1. 서론

접지전극에 임펄스전류가 유입된 때에는 접지전극의 인덕턴스나 토양의 정전용량의 영향에 의해 과도적으로 임피던스 특성이 나타나기 때문에, 접지저항보다는 접지임피던스에 의한 평가가 이루어져야 한다.[1] 전위 피크값과 전류 피크값의 비 V_p/I_p 를 규약접지임피던스라 하며, 접지시스템의 임펄스전류에 대한 과도적인 특성을 간이적으로 나타낸 것이다. 규약접지임피던스가 낮은 접지시스템은 뇌격전류가 흐를 때 전위상승이 낮으므로 피뢰설비용으로 성능이 양호한 접지시스템이라 볼 수 있다.[2] 본 논문에서는 분포정수회로모형을 이용하여 매설지선의 규약접지임피던스를 산출하였으며, EMTP를 이용하여 분포정수회로모형을 구현하였다. 매설지선의 분포정수회로모형을 이용한 모의해석결과와 실험결과와의 비교를 통해 분포정수회로모형의 이론적 타당성을 검토하였고, 이를 바탕으로 최초 단시간 뇌격전류와 후속 단시간 뇌격전류에 대한 매설지선의 규약접지임피던스에 대하여 해석하였다.

2. 기본이론

2.1. 규약접지임피던스

규약접지임피던스는 임펄스전류에 대한 접지전극의 임피던스 특성을 평가하는 척도로서 전위의 최대값과 전류의 최대값의 비로 식 (1)과 같이 정의한다.

$$Z = \frac{V_m}{I_m} [\Omega] \quad (1)$$

규약접지임피던스는 접지전극을 통하여 임펄스 전류가 흐를 때 그 접지전극에 인가되는 전위의 최대 크기를 의미하며 접지전극의 형상, 토양의 특성, 임펄스 전류의 파형에 따라 달라진다.[3]

2.2. 분포정수회로모형

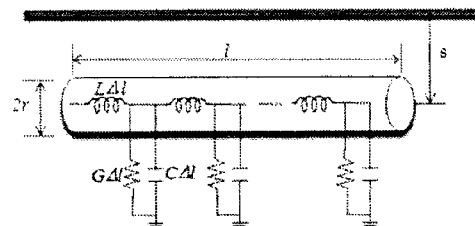


그림 1. 매설지선의 분포정수회로모형의 등가회로
Fig. 1. An equivalent circuit diagram for the distributed parameter circuit model of counterpoise

Sunde의 매설지선 접지저항식을 이용하여 식 (2)와 같이 접지저항 R_0 을 산출하고, 이 접지저항을 통해 매설지선의 단위길이당 분포회로정수 G, C, L 을 식 (3)~(5)와 같이 산정한다.

$$R_0 = \frac{\rho}{\pi l} \left[\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2rs}} \right) - 1 \right] \quad [\Omega] \quad (2)$$

$$G = \frac{\pi}{\rho} \frac{1}{\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2rs}} \right) - 1} \quad [S/m] \quad (3)$$

$$C = \frac{\pi \epsilon_r \epsilon_0}{\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2rs}} \right) - 1} \quad [F/m] \quad (4)$$

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2rs}} \right) - 1 \quad [H/m] \quad (5)$$

여기서 l 은 매설지선의 길이, r 은 매설지선의 반경, s 는 매설깊이, ρ 는 대지저항률, ϵ_r 은 토양의 비유전율, ϵ_0 은 진공의 유전율, μ_0 는 진공의 투자율이다.[4]

식 (3)~(5)의 매설지선 분포회로정수와 전송선로의 전파방정식을 이용하여 매설지선의 전류 인가점에서 바라본 임피던스를 식 (6)과 같이 산출하였다. $\dot{\alpha}$ 와 \dot{Z}_c 는 각각 전파정수와 특성임피던스로 분포회로정수와 관계는 식 (7), (8)과 같으며, 매설지선 끝단은 무부하상태로 가정하였다.[5]

$$\dot{Z} = \frac{\dot{E}_s}{\dot{I}_s} = \frac{e^{2\dot{\alpha}l} + 1}{e^{2\dot{\alpha}l} - 1} \dot{Z}_c \quad (6)$$

$$\dot{\alpha} = \sqrt{j\omega L(G + j\omega C)} \quad (7)$$

$$\dot{Z}_c = \sqrt{\frac{j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (8)$$

3. 모의해석조건

규약접지임피던스를 산출하기 위해 매설지선 50 m에 대하여 모의해석하였다. 접지전극은 단면적 25 mm²의 나동선으로 깊이 0.5 m에 매설하였으며 단일대지저항률을 갖는 토양으로 가정하였다. 50 m 매설지선의 접지저항을 측정하여 Sunde의 매설지선 접지저항식에 대입, 역산하여 대지저항률을 산정하였다. 토양의 비유전율은 4~81의 범위로 알려져 있으며[1], 측정된 토양의 토질이 습기가 많은 지역을 감안하여 80을 선정하여 모의하였다. 또한 인하도선의 영향을 고려하여 측정시 사용된 단면적 25 mm² GV전선 1.2 m를 인덕턴스로 산정한 결과 1.38 uH이며, 매설지선 앞단에 직렬로 접속하여 모의하였다.[4] EMTP에서 사용된 임펄스 전류원은 Heidler 전류원으로서 다음 식과 같다.[6]

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} e^{-(t/\tau_2)}, \quad \eta = e^{-\frac{\tau_1}{\tau_2} \left(\frac{\tau_2}{\tau_1} \right)^{1/n}} \quad (9)$$

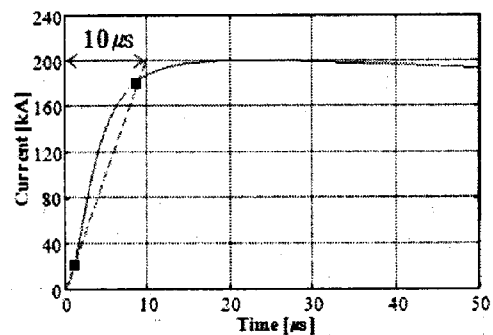
여기서, I_0 는 전류 펄스의 진폭, τ_1 은 파두시간정수(front time constant), τ_2 는 감쇠시간정수(decay time constant), n 은 2~10의 값을 갖는 지수, η 는 진폭보정인자(amplitude correction factor)이다.

표 1에 따르면 보호등급 I 등급에 해당하는 최초 단시간 뇌격과 후속 단시간 뇌격의 파라미터를 나타내고 있다.

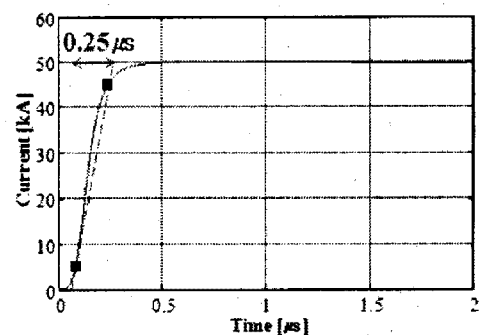
표 1. LPL I 에 따른 단시간 뇌격전류
Table 1. The short stroke currents for LPL I

파라미터	피크전류 [kA]	뇌격전류파형 [μ s]
최초 단시간 뇌격	200	10/350
후속 단시간 뇌격	50	0.25/100

표 1의 파라미터를 적용하여 최초 단시간 뇌격과 후속 단시간 뇌격에 대한 전류파형을 모의한 결과 그림 2의 전류파형과 같이 나타났다.



(a) 최초 단시간 뇌격전류



(b) 후속 단시간 뇌격전류

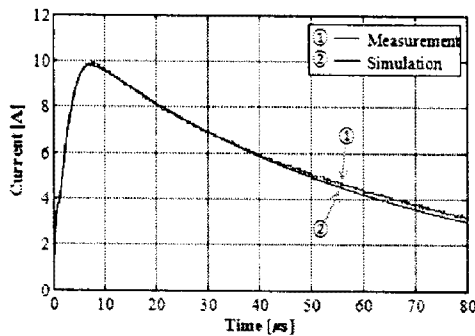
그림 2. 최초 단시간 뇌격전류 및 후속 단시간 뇌격전류의 모의

Fig. 2. The simulations of first short stroke and subsequent short stroke currents

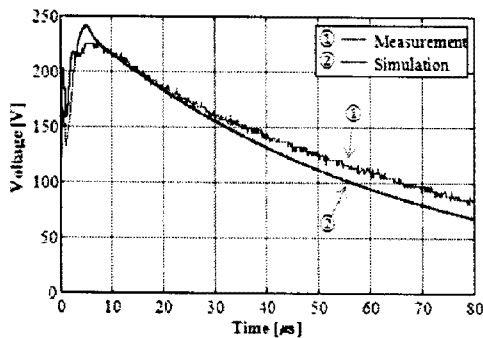
4. 시뮬레이션 결과

4.1. 매설지선에 대한 분포정수회로모델을 이용한 규약접지임피던스 산정의 타당성 검토

50 m 매설지선을 분포정수회로모델에 적용하여 EMTP로 출력전위와 규약접지임피던스를 모의하였고, 실험결과와 비교·분석하였다. 측정은 IEEE 81.2-1991에서 권고하는 수정된 전위강화법을 적용하여, 전류보조전극과 전위보조전극을 90°로 배치하고 50 m매설지선에 10 A를 흘려주어 시간에 따른 전압을 측정하였다.[7] 그림 3(a)와 같이 임펄스 전류원 식 (9)의 인자들을 조정하여 측정과 동일한 전류 파형을 구현하였다.



(a) 인가전류



(b) 출력전위

그림 3. 50 m 매설지선의 모의와 측정된 전류와 전위파형의 비교

Fig. 3. Comparison between the measured and simulated current and potential waveforms for the 50 m counterpoise

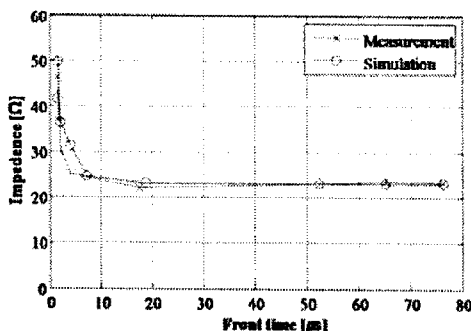


그림 4. 50 m 매설지선의 규약접지임피던스 측정결과와 모의결과와의 비교

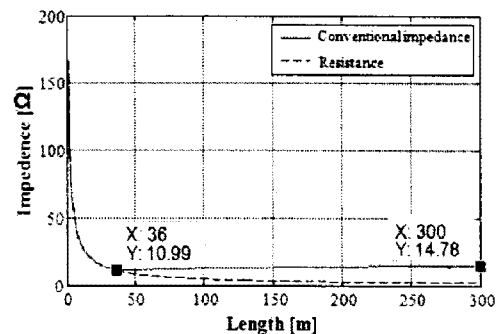
Fig. 4. Comparison between the measured and simulated results for the conventional impedance of the 50 m counterpoise

유사한 인가전류파형에 대한 분포정수회로모델의 전위파형과 측정에 의한 전위파형이 그림 3(b)에서 비슷한 경향을 보임을 확인하였다. 이러한 인가전류에 대한 전위를 바탕으로 매설지선에 인가되는 임펄스 전류의 파두시간을 변화시켜 나타나는 규약접지임피던스를 그림 4에 나타내었다. 느린 파두시간의 임펄스 전류를 인가한 경우 규약접지임피던스가 접지저항에 수렴하는 경향을 보인 반면 빠른 파두시간의 임펄스 전류를 인가한 경우 매설지선의 인덕턴스 영향에 의해 규약접지임피던스가 급격히 증가하는 경향을 보여주었고, 측정결과와 모의결과가 동일하게 이러한 경향을 보여 분포정수회로 모델에 의한 규약접지임피던스 모의의 타당성을 입증하였다.

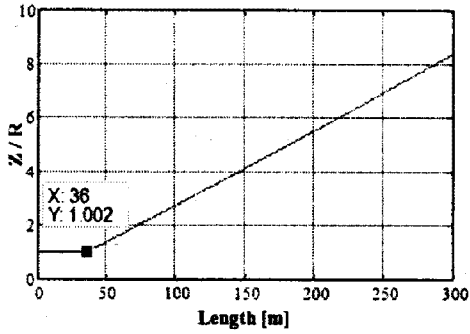
4.2. 매설지선의 길이에 따른 규약접지임피던스 모의

접지저항은 매설지선의 길이가 길어짐에 따라 낮아지지만 접지임피던스는 매설지선의 인덕턴스나 토양의 정전용량의 영향으로 길이에 따른 특성이 접지저항과 상이할 뿐 아니라, 경제적 여건상 무한정 늘릴 수 없기 때문에 적절한 매설지선의 길이를 산정하는 고찰이 필요하다.[6]

적절한 매설지선의 길이 산정을 위해 그림 5(a), 그림 6(a)와 같이 인가 전류파형의 파두시간과 대지저항률을 고정시키고 접지전극의 길이를 변화시켜 매설지선의 규약접지임피던스를 모의하였고, Sunde의 매설지선 접지저항과 비교·분석하였다. 인가 전류파형은 최초 단시간 뇌격과 후속 단시간 뇌격을 적용하였으며 대지저항률은 일반적인 점토질의 저항률인 200 Ω·m로 고정시켰다.



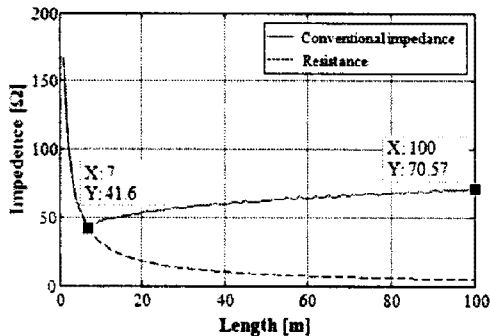
(a) 길이에 따른 규약접지임피던스 특성



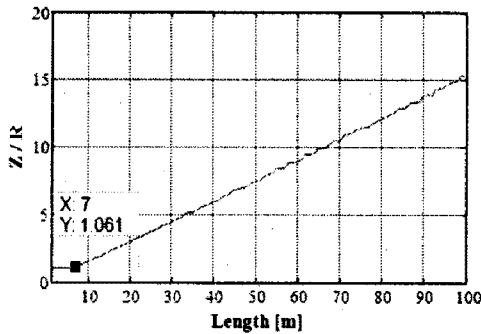
(b) 길이에 따른 Z/R 특성

그림 5. 길이에 따른 최초 단시간 뇌격전류에 대한 규약접지임피던스

Fig. 5. The conventional impedance against first short stroke current as a function of length



(a) 길이에 따른 규약접지임피던스 특성



(b) 길이에 따른 Z/R 특성

그림 6. 길이에 따른 후속 단시간 뇌격전류에 대한 규약접지임피던스

Fig. 6. The conventional impedance against subsequent short stroke current as a function of length

매설지선의 길이가 짧을 때에는 모의 결과가 접지저항과 동일하게 규약접지임피던스가 상승하는 경향을 보였으며, 최초 단시간 뇌격전류에 있어서는 36 m, 후속 단시간 뇌격전류에 있어서는 7 m보다 길어지게 되면 규약접지임피던스가 접지저항보다 커질 뿐만 아니라 오히려 규약접지임피던스가 증가하였다. 또한 파두시간이 느린 최초 단시간 뇌격전류가 흐르는 매설지선보다 파두시간이 빠른 후속 단시간 뇌격전류 매설지선이 더 짧은 길이에서 접지저항보다 커지는 현상을 보였고, 그림 3(b)와 그림 4(b)의 비교에서 후속 단시간 뇌격전류가

최초 단시간 뇌격전류보다 접지저항에 대한 규약접지임피던스의 비가 크게 나타났다. 이는 매설지선의 길이가 길어짐에 따라 매설지선 자체의 인덕턴스 영향 때문에 임피던스가 증가하는 것으로 보이며 상승시간이 짧아짐에 따라 고주파수 특성이 짧은 길이에서 더 크게 나타나는 것으로 판단된다.

5. 결론

매설지선의 규약접지임피던스 특성을 분석하기 위하여 분포정수회로를 EMTP로 구현하였다. 실험결과와 모의결과의 비교를 통해 매설지선에 대한 분포정수회로 적용의 타당성을 입증하였고, 이를 바탕으로 길이에 따른 규약접지임피던스를 모의하여 그 특성을 분석하였다.

모의결과 매설지선의 길이가 길어짐에 따라 규약접지임피던스가 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였으며, 인가된 임펄스 전류의 파두시간이 짧아짐에 따라 규약접지임피던스가 증가하는 길이가 짧아졌다.

따라서 매설지선에서는 뇌격전류의 파두시간에 의존적인 최소 임피던스를 갖는 길이가 존재하므로, 뇌격전류에 양호한 접지시스템의 설계를 위해 매설지선의 길이 산정시 이를 반영하여야 할 것이다.

참고 문헌

- (1) Silverio Visacro, "A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents", IEEE Trans. Power Del., Vol. 22, No. 1, Jan 2007
- (2) KS C IEC 62305-1, 피뢰시스템-제1부 : 일반원칙, 2007.
- (3) Y.Chen and P.Chowdhuri, "Correlation between laboratory and field tests on the impulse impedance of rod-type ground electrodes", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. Vol. 150, No. 4, July 2003
- (4) 이복희, "전력시스템공학", 인하대학교 출판부, pp.137~143, 2007.
- (5) 조정현, 김종호, 백영환, 김동성, 이강수, 김기복, 이복희, "매설지선의 임펄스임피던스의 해석", 한국조명·전기설비학회 학술대회논문집, pp. 88~91, 2009.
- (6) Leonid Groev, "Lightning Surge Characteristics of Earthing Electrodes," 29th International Conference on Lightning Protection, pp. 5a-1-1~16, 2008.
- (7) IEEE Std 81.2-1991, "IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems," IEEE Inc., pp.9~22, 1991.